

YETINIANDUDECE
DINGJIYINGYONG

液体粘度的 测定及应用

天津科学技术出版社

液体粘度的测定及应用

郭义明 陈克复 编著

天津科学技术出版社

液体粘度的测定及应用

邬义明 陈克复 编著

★

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷二厂印刷

天津市新华书店发行

★

开本787×1092毫米 1/32 印张 3 1/2 字数 72,000

一九八〇年九月第一版

一九八〇年九月第一次印刷

印数: 1—0,000

统一书号: 15212·11 定价: 0.35元

目 录

引言	(1)
液体的粘度及液体的流动概念	(4)
一、液体的基本性质	(4)
二、液体的粘度	(5)
三、粘性定律	(8)
四、牛顿液体和非牛顿液体	(11)
五、粘度的单位	(13)
六、单位换算	(14)
七、运动粘度	(16)
八、液体的流动概念	(20)
粘度计	(26)
一、各种粘度计	(26)
二、各种粘度计的比较	(31)
毛细管法测定液体的粘度	(34)
一、液体在毛细管中的流动	(34)
二、哈根—泊稷叶公式	(36)
三、粘度的测定	(38)
四、常用的毛细管粘度计及其粘度测定	(40)
五、毛细管粘度计的配件	(47)

回转法测定液体的粘度.....(51)

一、回转粘度计的原理.....(51)

二、回转粘度计的主要结构.....(58)

三、B型回转粘度计的使用.....(61)

落球法测定液体的粘度.....(71)

一、测定原理.....(71)

二、数据的习惯处理.....(74)

三、落球粘度计.....(75)

四、郝泼儿粘度计.....(76)

液体粘度的应用.....(80)

一、用于化工液体输送的设计.....(80)

二、用于高分子化合物的生产控制及科学研究.....(92)

引 言

物质在自然界中是以固体、液体和气体三种状态中的任一态存在的，这就是物质聚集状态的三态。

气体的基本特征就是它的无限膨胀性，即其分子间的内聚力极小，内聚力的作用要比其分子运动的分散作用小许多倍。因此，气体既没有一定的形状，也没有一定的容积，即使用微量的气体放置在任何形状的容器之中，这种气体不仅能占有最大可能性的容积而且还均匀地充满整个容器。

液体也是无定形的，但在一定的条件下具有一定的容积。它与气体一样，都具有流动性。因此，它与气体共称为流体。但液体分子间的距离比气体的小得多；流动性也不如气体那么大；它的密度也较气体大得多，随着温度的上升，液体的密度急剧下降，直至临界温度（气化点）时，液体和气体的差别才不复存在。

固体不同于气体和液体，它不仅具有一定的容积，而且还具有一定的形状。与气体和液体不同，它的分子间存在着强大的结合力，不易自由移动，而只能围绕它自己的一个中心位置作振动和热运动。温度愈高，运动愈激烈。在适当的温度下，固体可变为液体，即称为熔化，其温度即为熔点。此外，固体还可分为晶体和非晶体两类。

物质虽以三态中的任何一态存在于大自然中，但究竟以何态存在，取决于存在的条件。象水在标准压力下，在 0°C

以下则以固体状态一冰存在；如果温度高于 100°C ，则以气体状态一蒸汽存在。三种聚集状态的根本区别在于分子运动的特点。液体居于固体和气体之间，其分子运动不象气体那样不规则，但比固体的分子运动要不规则得多。

在化学、石油、轻化和化纤等许多工业中，其原料、中间产品及成品大多呈流体状态，如煤油、汽油、硫酸、甲醇、酒精和氨等等。这些流体除了具有密度、比热、气化点及冰点等特性以外，还有一个共同的物理性质就是粘性。粘性是一切流体（包括液体和气体）的重要物理性质之一。衡量流体粘性大小的物理量就是粘度。

粘度反映出流体流动行为的特征。所谓流动，就是在重力或外力作用下产生连续变形的过程；粘度的概念就是流体分子之间内摩擦的概念。粘度的本质就是在流动着的流体中，与流动方向相垂直的横截面上流体的流动速度大小不同的原因。

粘度既然是流体的重要物理性质之一，那么，粘度的测定在工业生产中和基础学科中是非常重要的，应用范围也很广。其应用主要表现在：

首先，用于流体输送系统的设计。如果用管道来输送原油，原油的粘度是计算管道输送阻力的主要物理量之一。因此，直接影响其输送系统中输送机械的选用和输送工艺的设计。

其次，用于化工机械的设计。在化工厂的搅拌器、热交换器等化工机械的设计中，由于流体粘度直接影响搅拌器的阻力和热交换器的效率，因此在设计这些机械时，粘度是主要参量之一。

第三，用于高分子化学工业中检验原料、中间产品、成品的质量和控制工艺。由于高分子化合物的分子大小、形状直接影响其溶液的粘度，又因其分子的大小、形状和排列直接决定其成品的性质，所以高分子化合物溶液的粘度就与化合物的性质直接关联起来。在 高分子化学工业中，常用其溶液粘度来检验原料、中间产品、成品质量和控制其生产工艺。例如：在生产塑料、粘合剂和合成纤维等过程中，一个非常重要的工艺指标就是控制这些产品的聚合度，而聚合度的大小可用这种高分子化合物稀溶液的粘度来测定。因此，在 高分子化学工业中，粘度的测定是必不可少的检验项目之一。

第四，用于高分子化合物的科学研究。不论天然高分子化合物或合成高分子化合物，它们的聚合度大多都可用它们的稀溶液粘度来测定，而聚合度又是影响高聚物各项性质极为重要的因素之一。因此，在 高分子化合物的科学研究中，粘度测定的使用极为广泛。

流体的粘度及其测定方法的研究至今已有一百多年的历史了。随着科学的发展，目前已出现了不少精密的新仪器和准确的测定方法。

由于液体的粘度测定较气体的粘度测定在研究和应用中更广泛、更重要和更普遍，故本书仅对液体的粘度测定和应用加以介绍。

液体的粘度及液体的流动概念

一、液体的基本性质

1. 液体的连续性

对于液体，可以把它看作是由无数个具有足够分子量的液体微团所组成的连续介质。微团之间没有间隙，一个紧挨一个。液体在流动时，液体微团不但本身连续，而且在流动过程中也连续。所谓“刀切不开水”就是这个道理。根据这个道理，可以认为在测量液体粘度时，被测液体都是连续的。

2. 可压缩性

在实际流体中，不但气体是可压缩的，液体也是可压缩的。也就是说，液体和气体一样，它的密度都是随着压力与温度的改变而发生变化的（在多成分的液体中，它的密度还要随着各成分浓度的变化而改变）。这种性质，称为液体的可压缩性。例如水，在温度不变的情况下，每增加一个大气压，它的体积就要比原有体积减少0.005%左右。但一般来说，液体的压缩性很小，在测量粘度时，如果考虑到它的压缩性，反而把问题搞得复杂而不易解决，所以在测量液体粘度时，可以把液体当作不可压缩流体看待。实际上，在其它工程技术上，也往往把液体作为不可压缩性流体来对待。

3. 导热性

液体也能导热。液体导热的实质同样是分子热运动的结

果，就是在液体微团之间由于分子热运动而产生能量交换的结果。了解了这一点，在测定液体粘度时，对正确控制液体的温度是很有用处的。

二、液体的粘度

什么是液体的粘度？

当我们观察河道中水的流动时，就可以明显地看到，越靠近河岸，水流就越慢；在河道中心处的水流速度最快，而在河边靠岸处的水流似乎不动。这说明水流在河道横截面上各点的速度是不同的。这种现象在其它液体流动中也同样存在。如果我们仔细地观察玻璃管内的液体流动，也会发现，越靠近管壁处的液体，流动就越慢。为了解产生这种流动液体在与流动方向相垂直的横截面上各部分速度不同的原因，可以先简单地研究一下两平板之间的液体流动。

设有两块面积很大而相距很近的平板A和B，中间充满着液体。如果上平板B以速度 U_B 向前保持匀速运动，下平板A保持不动（如图1），就会发现，靠近平板B的一层液体由于粘附也会以同样的速度 U_B 向前作匀速运动；不靠近平板B的液体层，虽然也向前运动，但距B板越远，其流速也就越慢。而靠近A板的液体层，由于粘附于A板其速度等于零。

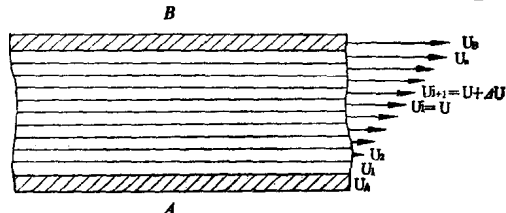


图1 液体在匀速运动的平板B和静止平板A之间流动示意图

现假定把A、B二板间的液体分成无数薄层,各层向前运动的速度分别记为: $U = U_A, \dots U_i = U, U_{i+1} = U + \Delta U \dots U_n = U_B$,那么:

$$U_B = U_n > U_{n-1} > \dots > U_{i+1} > U_i > \dots > U_2 > U_1 = U_A = 0$$

图2表示在两平板A和B之间各液体薄层的速度变化情况。其变化规律总是上面液体薄层的流速大于它相邻的下面液体薄层的流速,即总存在着速度差 ΔU 。这样,上层液体总对它相邻的下层液体有带动作用,下层液体对它相邻的上层液体有拖曳作用。这就说明,液体薄层之间有相互作用的剪切力存在,这种相互作用的剪切力叫做液体的内摩擦力。

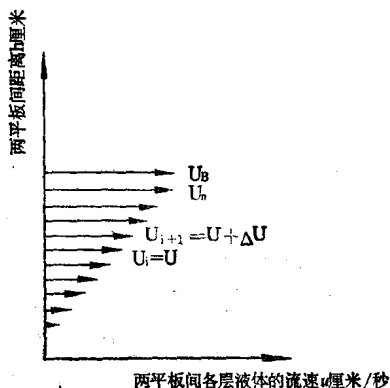


图2 液体在平板A、B之间流动时,液体各薄层的速度变化图

液体在管道内的流动状况也是一样的。贴近管壁的一层液体由于粘附于管壁,速度为零,而在管轴心处的速度最大。按上面同样的假设,也可把管内的液体分割成无数极薄的圆筒,一层套着一层(如图3)。各层以不同速度向前运动,而以管子轴心处的液体小圆柱的速度为最大,越向外的液体薄圆层的速度就越小,相邻两薄层之间也同样存在着速度差 ΔU 。基于同样的道理,二液体薄圆层之间也存在着拖曳作用和带动作用,也就是存在着液体的内摩擦力。

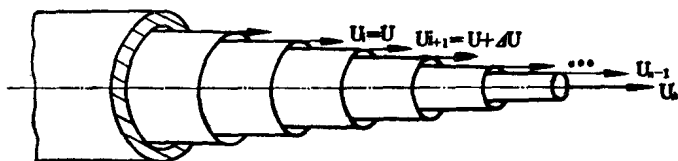


图 3 液体在圆管内分层流动示意图

可以认为，液体层之间的速度差是由于液体层之间的内摩擦力引起的，液体的内摩擦力越大，其速度差也就越大。

靠近静止平板A的液体层和靠近管壁的液体层速度都为零，而紧靠平板B的液体层的速度与作匀速运动的平板B的速度相等，都为 U_B ，这是由于液体的粘附力所引起的，有时把这种粘附力叫外摩擦力。

液体具有内摩擦力的原因在于液体内部分子间相互吸引力和分子不规则的运动这两个因素。一层液体要向前运动，就要克服这层液体和与之相邻的液体分子间的吸引力及分子运动的动力，也就是要克服一定的内摩擦力。

表示液体具有内摩擦力的物理性质就是粘性，衡量液体粘性程度的物理量就是粘度，以 η 表示。

液体的粘度越大，就表明分子间的吸引力越大，流动时内摩擦力也越大，从而液体流动起来就越困难。在同样条件下，油比水流得慢，就是因为油的粘度比水的粘度大的原因。因此可从一种液体的粘度大小看出这种液体的流动性的好坏。有时还引入一个流度的概念，液体粘度的倒数就是流度，即流度 $=\frac{1}{\eta}$ ，它可以直接表示液体流动性的好坏。

必须指出，液体的粘度只有在液体流动时才表现出来，相对静止的液体是表现不出粘度的，因为这时候液体的内摩

擦力等于零。液体不同于固体，固体之间有静摩擦力存在，而液体不存在静摩擦力。

三、粘性定律

为了推导粘性定律，可以从图 1 中两平板 A、B 之间的液体中假定取出相邻液体薄层来进行分析（如图 4）。

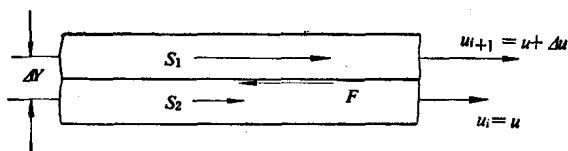


图 4 在两平板 A、B 之间的液体中两相邻液体薄层的流动示意图

设上液体薄层在力 S_1 作用下以 $U + \Delta U$ 的速度向前运动，下液体薄层在力 S_2 的作用下以 U 的速度也向前运动，速度差为 ΔU ，并且均为稳定流动，不存在加速度和减速度。假定此两液体薄层都具有同样的尺寸和形状，面积都为 A ，相距为 ΔY 。

根据上面的分析，既然这两相邻液体薄层之间存在速度差，那么，这两液体薄层之间就一定存在内摩擦力，其大小设为 F 。很明显，在所考虑的区域，根据力学原理，产生这两液体薄层相对运动的作用力 $S_1 - S_2$ 必须和内摩擦力 F 相等。即：

$$F = S_1 - S_2$$

设 $S_1 - S_2 = S$

则 $F = S$

内摩擦力 F 因与受力面平行，故也称为液体的剪切力，

单位面积上的剪切力称为剪切应力，以 f 表示。 $f = \frac{F}{A}$

根据牛顿的假设，对于大多数的液体，内摩擦力 F 与液体薄层间的相对速度差 ΔU 和液体薄层面积 A 成正比，与两液体薄层之间的距离 ΔY 成反比。设比例系数为 η ，故：

$$F = \eta \frac{\Delta U \cdot A}{\Delta Y} \quad \text{式(1)}$$

等式两边同除以 A ，则：

$$f = \frac{F}{A} = \eta \cdot \frac{\Delta U}{\Delta Y} \quad \text{式(2)}$$

式中： f —剪切应力 [公斤(力)/米²]

ΔU —两液体薄层间的速度差 [米/秒]

ΔY —两液体薄层间的距离 [米]

比例系数 η 随液体而异。液体的粘性愈大，两相距单位距离的液体薄层要得到同样的速度差（即有同样的 $\frac{\Delta U}{\Delta Y}$ ）时，所需要的推动力就愈大，剪切应力也就越大，即 f 越大。从式（2）导出， η 值也就越大。故 η 值反映了液体的粘性程度，称为粘度。而 $\frac{\Delta U}{\Delta Y}$ 是液体层在与流动方向相垂直的方向上速度的变化率，称为速度梯度。

式（2）就是流体的牛顿粘性定律：流体的粘性愈大，则在流动时产生一定的速度梯度的剪切应力就愈大。所以粘度的物理意义是：促使流体流动产生单位速度梯度的剪切应力。

式（2）不但用来表示粘度的物理概念和推导粘度单位，而且还可以在测出剪切应力 f 和速度梯度的大小时用它计算出液体的粘度值来。目前工业上常用的回转式粘度计就

是基于这个原理设计的。

粘度反映液体本身存在的性质，它不受液体流速和压力的影响，但要受温度的影响。表1就是水的粘度随温度的升高而减少的情况。产生这种情况的原因在于温度升高，液体内部分子运动激烈，使其相互吸引力减弱，从而使内摩擦力变小的缘故。

阿累尼乌斯发现的绝对温度与液体粘度之间的关系，可用11页的式(3)表示：

表1 水的粘度(0°C~100°C)

温 度 °C	粘 度 (厘泊)	温 度 °C	粘 度 (厘泊)	温 度 °C	粘 度 (厘泊)
0	1.7921	36	0.7085	72	0.3952
2	1.6728	38	0.6814	74	0.3849
4	1.5674	40	0.6560	76	0.3750
6	1.4728	42	0.6321	78	0.3655
8	1.3862	44	0.6097	80	0.3565
10	1.3077	46	0.5883	82	0.3478
12	1.2363	48	0.5683	84	0.3395
14	1.1709	50	0.5494	86	0.3315
16	1.1111	52	0.5315	88	0.3239
18	1.0559	54	0.5146	90	0.3165
20	1.0050	56	0.4985	92	0.3095
22	0.9579	58	0.4832	94	0.3027
24	0.9142	60	0.4688	96	0.2962
26	0.8737	62	0.4550	98	0.2899
28	0.8360	64	0.4418	100	0.2838
30	0.8007	66	0.4293		
32	0.7679	68	0.4174		
34	0.7371	70	0.4061		

$$\log \eta = \frac{A}{T} + B \quad \text{式 (3)}$$

式中A、B都是常数，不受温度的影响。

式中：T—液体的绝对温度 [°K]

$$T = (273 + t) ^\circ K$$

t—摄氏温度 [°C]

四、牛顿液体和非牛顿液体

上面推导了流体的牛顿粘性定律，在客观存在的流体中，多数液体和所有的气体都符合牛顿粘性定律，即流动剪切应力 f 与速度梯度成正比关系，在一定的温度下，其粘度数值是固定的。这样的流体，称为牛顿型流体。表2表示了几种牛顿型液体在温度20°C时的粘度值。

但是并不是所有的液体都符合牛顿粘性定律的。有一部分液体，虽然本身粘度是随温度的高低而变化的，但在一定的温度下，粘度的数值也是不固定的，也就是说，剪切应力 f 与

速度梯度 $\frac{\Delta U}{\Delta Y}$ 不成正比例，不符合牛顿粘性定律。对这样的液体，称之为非牛顿型的液体，如油漆、高分子聚合物的溶液、泥浆和纸浆悬浮液等。

非牛顿液体由于种类繁多，性质各异，对它们的流动特性的认识还没有找出统一的规律。目前有几种可能的途径来研究非牛顿液体，多数是从它们各自的物理或化学性质的角度通过实验来研究的。

非牛顿液体所具有的粘度，一般称为广义粘度（或拟粘度），以区别于牛顿流体，以 η_{sp} 代表。广义粘度也可直接

表2 几种液体在温度20°C时的粘度值

液 体 名 称	粘 度 (厘泊)
水	1.0050
乙醚	0.2345
水银	1.55
苯	0.6470
甲醇	0.5985
乙醇	1.2155
硫酸	21.90
甘油	1499
一般润滑油	800
蓖麻油	1000
普通煤焦油	8000
酚	8.40 (50°C)
硝酸	1.17 (10°C)
二硫化碳	0.38
煤油	3
汽油	0.7~0.8

用粘度计来测定，但测出的粘度值只不过是液体的瞬时粘度值，也就是该液体处于某一特定条件下在某一时刻所具有的粘度数值。

牛顿流体和非牛顿流体所具有粘性的原因都是一样的，而且它们的粘度值都不会等于零。